

## 配管検査ロボットの自己位置推定に関する検証

### Investigation of self-localization method of the piping inspection robot

○学 神野 義久 (弓削商船), 正 前田 弘文 (弓削商船)

Yoshihisa JINNO, National Institute of Technology, Yuge College,

1000 Yuge Shimoyuge, Kamijima-cho Ochi-gun, Ehime, 794-2506, Japan

Hirofumi MAEDA, National Institute of Technology, Yuge College,

1000 Yuge Shimoyuge, Kamijima-cho Ochi-gun, Ehime, 794-2506, Japan

**Key Words:** Exploration robot, Mobile robot, Robot control, Water pipe, Distributed processing system

#### 1. 緒言

我国では昭和 40 年代以降, 下水道事業の実施都市が急増し, 各地で下水道整備の普及が促進されてきた. これまでに全国の下水道施設は, 管路総延長約 460,000 [km], 下水処理場数約 2,200 ヶ所となっている. そのため, 管理施設の増加とともに, 長期使用施設の老朽化が顕在化している. 下水管渠の標準的耐用年数は 50 年とされており, すでにこの年数を超える下水管渠の延長は約 10,000 [km]以上となっている. また, 管渠布設後 30 年が経過すると道路が陥没する箇所が急増する傾向もある. このような背景から, 排水管・下水管の維持管理は重要であり, 継続的に行っていかなければならない. しかし, 実際に管内を検査する作業は, 人が行うには過酷であり, 検査範囲も広大である. そこで, 近年ではロボットを用いた検査が活発に行われている. ところが, これらのロボット検査にも問題があり, 有線による外部制御・外部電源が主流であることから, ロボットシステム全体が大掛かりなものとなっている. そのため, メンテナンス性が悪く, 高価なシステムとなっている.

そこで, 本研究ではこれまで研究してきたレスキューロボットのノウハウを活かし, 自律で持ち運びが容易な小型配管検査ロボットの開発を行ってきた<sup>(1)~(5)</sup>. 自律型小型配管検査ロボットは, 安価で軽く, 持ち運びが容易である. また, 自律制御で検査を行うために, 複数の配管を同時に検査できるという大きな特徴を有している. しかし, ロボットが小型であることから, 転倒を防止するためにタイヤ交換を行い, 複数の管径に対応しなければならない. このことは, タイヤ交換によるタイムロスだけでなく, 交換時の部品の紛失, タイヤ・交換工具の運搬, コストなど数多くの問題を抱えることに繋がった. そこで我々は, 直進制御によってロボットの転倒を防止することで, 1 種類のタイヤで複数の管径に対応する方法を提案した. 本論文では, 直進制御を行うために必要となる自己位置推定について, その推定方法と数値解析による解法について述べる.

#### 2. 自律型小型配管検査ロボット

自律型小型配管検査ロボットを図 1 に示す. この小型配管検査ロボットは直径 150 [mm]もしくは 200 [mm]の配管内を撮影しながら自律で異常箇所を検査する. また, マンホールの真下を検知し, 検査開始地点に戻ってくる. さらに, 障害物を検知した場合は, その障害物を押し除けることができるか判断し, 不可能な場合は検査を中断し帰還する.



Fig. 1 Autonomous pipe inspection robot

#### 3. 小型配管検査ロボットの自己位置推定

小型配管検査ロボットの検査対象は, 硬質ポリ塩化ビニル管などで, 壁面にタイヤが乗り上げ, 転倒する恐れがある. そのため, 従来の配管検査ロボットでは配管の管径に合わせたおわん型のタイヤに変更することで転倒を抑制し, 人がモニタ越しに遠隔操作することで転倒を防止してきた. そこで, 我々は小型配管検査ロボットに直進制御を組み込むことで, これまで人がモニタ越しで行ってきた遠隔操作を自動化することで, 完全なスタンドアロンを実現した. しかし, 現在実装されている直進制御では, 従来のロボットと同じく, 配管の管径に対応するタイヤに交換しなければ転倒を防止することはできない. そこで本論文では, 直進制御の精度向上に必要な小型配管検査ロボットの自己位置推定について示す.

##### 3. 1 重力加速度に関する条件式

小型配管検査ロボットには, 加速度センサを搭載しており, そのセンサ値より重力加速度方向を算出することができる. この重力加速度方向から配管内におけるロボットの姿勢 (ロール, ピッチ) は, 式 (1) の条件式を満たす. なお, それぞれの変数は以下と定義する.

${}^{\circ}\alpha_r$	: $x$ 軸の回転角度 (絶対座標系)
${}^{\circ}\beta_r$	: $y$ 軸の回転角度 (絶対座標系)
${}^{\circ}\gamma_r$	: $z$ 軸の回転角度 (絶対座標系)
${}^{\circ}x_r$	: ロボットの $x$ 座標 (絶対座標系)
${}^{\circ}y_r$	: ロボットの $y$ 座標 (絶対座標系)
${}^{\circ}z_r$	: ロボットの $z$ 座標 (絶対座標系)
$fl$	: ロボットの左前輪

- $fr$  : ロボットの右前輪
- $bl$  : ロボットの左後輪
- $br$  : ロボットの右後輪
- ${}^0x_i$  : ロボットのタイヤの  $x$  座標 (絶対座標系)
- ${}^0y_i$  : ロボットのタイヤの  $y$  座標 (絶対座標系)
- ${}^0z_i$  : ロボットのタイヤの  $z$  座標 (絶対座標系)
- ${}^rx_i$  : ロボットの  $x$  座標 (ロボット座標系)
- ${}^ry_i$  : ロボットの  $y$  座標 (ロボット座標系)
- ${}^rz_i$  : ロボットの  $z$  座標 (ロボット座標系)
- ${}^ra_x$  : 加速度センサの  $x$  成分 (ロボット座標系)
- ${}^ra_y$  : 加速度センサの  $y$  成分 (ロボット座標系)
- ${}^ra_z$  : 加速度センサの  $z$  成分 (ロボット座標系)

$$\begin{aligned}
{}^0\alpha_r &= -\tan^{-1} \frac{{}^ra_y}{{}^ra_z} \\
{}^0\beta_r &= -\tan^{-1} \frac{{}^ra_x}{{}^ra_z} \\
{}^0p_i &= \begin{bmatrix} {}^0x_i \\ {}^0y_i \\ {}^0z_i \end{bmatrix} \quad (i = fl, fr, bl, br) \\
&= \begin{bmatrix} \cos {}^0\gamma_r & -\sin {}^0\gamma_r & 0 \\ \sin {}^0\gamma_r & \cos {}^0\gamma_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos {}^0\beta_r & 0 & \sin {}^0\beta_r \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin {}^0\beta_r & 0 & \cos {}^0\beta_r \end{bmatrix} \\
&\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos {}^0\alpha_r & -\sin {}^0\alpha_r \\ 0 & \sin {}^0\alpha_r & \cos {}^0\alpha_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^rx_i \\ {}^ry_i \\ {}^rz_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^0x_r \\ {}^0y_r \\ {}^0z_r \end{bmatrix} \quad (1)
\end{aligned}$$

### 3. 2 タイヤの接地点に関する条件式

小型配管検査ロボットは、配管検査中にタイヤが管の壁面に接触する。しかし、配管が円柱であるため、全ての4つのタイヤが接地することはなく、通常は3点、ロボット本体が振動している際は2点のみが接地する。なお今回は、振動時は考慮しないため、接地は3点とし、円の公式より式(2)の条件式を満たすものとする。なお、それぞれの変数は以下と定義する。

- ${}^sy_i$  : ロボットのタイヤの  $y$  座標 (パイプ座標系)
- ${}^sz_i$  : ロボットのタイヤの  $z$  座標 (パイプ座標系)
- $r_s$  : パイプの半径
- $\theta_s$  : 地面に対するパイプの傾き

$$\begin{aligned}
{}^sy_i &= ({}^rx_i \cos {}^0\beta_r + {}^ry_i + {}^rz_i \cos {}^0\alpha_r \sin {}^0\beta_r) \sin {}^0\gamma_r \\
&\quad + ({}^ry_i \cos {}^0\alpha_r - {}^rz_i \sin {}^0\alpha_r) \cos {}^0\gamma_r + {}^0y_r \\
{}^sz_i &= ({}^ry_i \cos {}^0\alpha_r \sin \theta_s - {}^rz_i \sin {}^0\alpha_r \sin \theta_s) \sin {}^0\gamma_r \\
&\quad + (-{}^rx_i \cos {}^0\beta_r \sin \theta_s - {}^ry_i \sin {}^0\alpha_r \sin {}^0\beta_r \sin \theta_s \\
&\quad - {}^rz_i \cos {}^0\alpha_r \sin {}^0\beta_r \sin \theta_s) \cos {}^0\gamma_r \\
&\quad + ({}^rx_i \sin {}^0\beta_r \cos \theta_s + {}^ry_i \sin {}^0\alpha_r \cos {}^0\beta_r \cos \theta_s \\
&\quad + {}^rz_i \cos {}^0\alpha_r \cos {}^0\beta_r \cos \theta_s) + {}^0z_r \cos \theta_s \\
r_s^2 &= {}^sy_i^2 + {}^sz_i^2 \quad (2)
\end{aligned}$$

### 3. 3 $x$ 成分の取り扱い

3.1, 3.2より、未知変数6つに対し、条件式が5つ導出できた。そこで、未知変数の1つである小型配管検査ロボットの  $x$  成分 ( $x$  軸は配管内におけるロボットの進行方向) について考える。 $x$  成分は検査時に小型配管検査ロボットが実際

に進んだ距離を意味する。そのため、 $x$  成分は小型配管検査ロボットに搭載されたエンコーダによって、オドメトリから別途算出することができる。そこで、 $x$  成分を原点座標に常に重ねる ( $x$  成分を無視する) ことで未知変数を5つに減らす。

### 4. 数値解析による解の導出

加速度センサから得られた値を用いて自己位置推定を行う場合、式(2)の円の公式の中に三角関数が含まれることから、代数的な方法で  ${}^0\gamma_r$  の解を求めることができない。そこで数値解析的に解を導出できるか検証を行った。式(3)は式(2)の左辺と右辺の差分をとったものであり、 ${}^0\gamma_r$  について  $\pm 30[\text{deg}]$  の範囲で数値解析を行った結果、式(3)が0に収束する (一意に解が定まる) ことを確認した (図2)。

$$\left| {}^sy_i^2 + {}^sz_i^2 - r_s^2 \right| \quad (3)$$

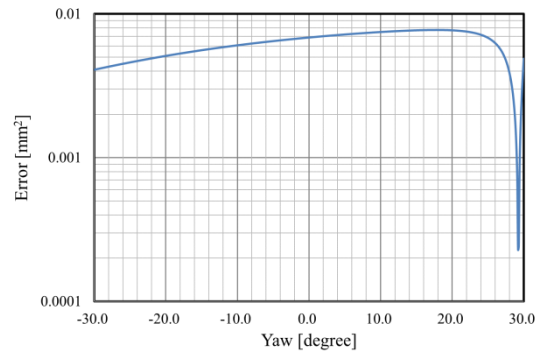


Fig. 2 Result of numerical analysis

### 5. 結言

本論文では、小型配管検査ロボットの自己位置推定について述べた。また、自己位置推定を実現する上で必要となる条件式と数値解析による解の導出についても述べた。

今後は、小型配管検査ロボットに実装の上、直進制御の精度向上を行っていく予定である。

### 文献

- (1) 二宮 綾香, 藤田 和友, 佐々木 俊一, 後藤 幹雄, 前田 弘文, “配管検査ロボットのための試作機設計”, 日本機械学会第43回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, 716 (2013).
- (2) 藤田 和友, 伊藤 嘉基, 前田 弘文, “配管検査ロボットのためのモジュール化”, 第14回システムインテグレーション部門講演会(SI2013) (2013), pp.1297~1300.
- (3) 藤田 和友, 佐々木 俊一, 後藤 幹雄, 伊藤 嘉基, 前田 弘文, “モジュール化による配管検査ロボットの小型化”, 日本機械学会第44回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, 613 (2014).
- (4) 前田 弘文, 河村 拓弥, 藤田 和友, 伊藤 嘉基, 佐々木 俊一, 後藤 幹雄, “配管検査ロボットに関する研究開発 -第1報: 小型化のための試作機設計-”, 弓削商船高等専門学校紀要第36号 (2014), pp.79~82.
- (5) 前田 弘文, 伊藤 嘉基, 佐々木 俊一, 後藤 幹雄, “配管検査ロボットに関する研究開発 -第2報: メンテナンス向上のための試作機設計-”, 弓削商船高等専門学校紀要第37号 (2015), pp.75~79.